

MODELISATION DES TRANSFERTS D'EAU, DE SOLUTES ET DES INTERACTIONS GEOCHIMIQUES SOL-SOLUTION SOUS IRRIGATION

Serge MARLET¹, Pascal BOIVIN³, Laurent BRUCKLER², Nicolas CONDOM¹, Mohamed Koulam DICKO⁴, Claude HAMMECKER³, François LAFOLIE², Jean-Luc MAEGHT³, Mamadou Kabirou N'DIAYE⁴ et Vincent VALLES²

¹ CIRAD-AMIS, programme Agronomie, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

² INRA, Unité de sciences du sol, domaine Saint Paul, 84914 Avignon Cedex 9, France

³ IRD, Unité de Recherche ARIANE, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France

⁴ IER, Pôle Systèmes Irrigués, BP 73, Niono, Région de Ségou, Mali

Mots-clés : Modélisation, Transport de solutés, Géochimie, Alcalinisation, Irrigation

I - INTRODUCTION

En raison d'une alcalinité résiduelle positive des eaux d'irrigation (Al Droubi, 1980 ; Marlet *et al.*, 1998), la concentration de la solution du sol conduit à une augmentation de l'alcalinité et à une adsorption rapide de sodium sur le complexe d'échange cationique. Ces processus d'alcalinisation et de sodisation, et la baisse de fertilité qui en résulte, sont susceptibles d'affecter les performances des systèmes irrigués en Afrique subsaharienne (Bertrand, 1994). Ces processus résultent à la fois de mécanismes hydrologiques de concentration de la solution du sol sous l'influence d'un lessivage insuffisant, d'une position subaffleurante de la nappe ou de dysfonctionnement du système de drainage, et de mécanismes géochimiques déterminant l'évolution des propriétés chimiques des sols irrigués. Le couplage de modèles de transport et de géochimie est alors nécessaire pour rendre compte de ces évolutions.

Ces dernières années, de nombreux modèles couplant géochimie et transport ont été élaborés. Parmi eux, les modèles LEACHM (Hutson et Wagenet, 1995) et UNSATCHEM (Simunek et Suarez, 1994) sont plus spécifiquement destinés à prédire la chimie des ions majeurs et les processus de salinisation des sols. Cependant, les mécanismes géochimiques considérés sont apparus insuffisants pour rendre compte des phénomènes d'alcalinisation des sols : nature des minéraux considérés, modélisation des échanges cationiques, ..., tandis que certaines procédures retenues dans le modèle n'apparaissaient pas fonctionnelles : hypothèse d'équilibre chimique, couplage du module géochimique sur le module de transport, ... Un nouveau modèle a été développé et calibré sur monolithes de sol non remaniés (Condom, 2000).

II – MATERIELS ET METHODES

Présentation du milieu

La zone d'étude se situe au Mali dans les périmètres irrigués de l'Office du Niger, au sud du Kala inférieur à proximité de la ville de Niono. Le climat est semi-aride, de type soudano-sahélien ; les précipitations annuelles s'élèvent à 460 mm, concentrées pendant la saison pluvieuse de juin à octobre. L'évapotranspiration potentielle est proche de 2500 mm/an. Ce déficit climatique favorise la concentration des solutés et représente la cause première de salinisation des sols.

Après environ 50 années de riziculture irriguée, le milieu physique a connu de sensibles évolutions. Le niveau de la nappe a été rehaussé de 40 mètres et est aujourd'hui subaffleurant. Le drainage naturel du milieu est limité en raison d'une faible transmissivité de l'aquifère et ne permet pas l'évacuation des sels apportés par l'irrigation. Les sols initialement légèrement acides ont connu une augmentation du pH de 1 unité en moyenne. Sur près de 30% des superficies, le pH des sols peut dépasser 8.0 en relation avec une augmentation de leur sodicité, confirmant ainsi la nature alcalinisante des eaux d'irrigation.

Les sols de l'Office du Niger apparaissent d'une grande complexité héritée. Ils résultent, d'une part des modalités de mise en place des matériaux dans un environnement deltaïque, et d'autre part, de l'évolution des sols sous l'influence du fonctionnement hydrologique imposé par les caractéristiques du milieu physique et les modalités de gestion des systèmes de culture, de l'irrigation et du drainage.

Présentation du modèle

Le modèle PASTIS de transport de l'eau et des solutés est issu du modèle proposé par Lafolie (1991). L'équation de Richards est utilisée pour décrire les transferts hydriques monodimensionnels et verticaux. Le transport des solutés est régi par l'équation de convection dispersion et toute l'eau est supposée active dans le processus. La paramétrisation du modèle consiste en la définition des conditions aux limites du système et des propriétés hydrodynamiques des différentes couches de sol: $\psi(\theta)$, $K(\theta)$ et dispersivité.

Le modèle géochimique IRRICHEM (Marlet *et al.*, 1998) est issu du modèle GYPSOL (Vallès et Bourgeat, 1988). La loi de Debye-Hückel étendue aux solutions salines est utilisée pour le calcul de l'activité des espèces ioniques. Le modèle prend en compte la cinétique des processus de précipitation ou dissolution de minéraux et des échanges de cations. Les cinétiques sont considérées comme proportionnelles à l'enthalpie libre de la réaction. Dans l'étude des phénomènes d'alcalinisation, ont été considérés :

- 7 éléments chimiques majeurs (Ca, Mg, Na, K, Cl, S et Si). Le profil de pression partielle en CO_2 et son évolution sont imposés comme paramètre d'entrée. L'alcalinité est calculée en supposant la neutralité électrique de la solution
- 34 espèces ioniques issues de la combinaison de paires d'ions en solution
- 6 minéraux : la calcite, la silice amorphe, la sépiolite, la kaolinite, une illite et le gypse. La solution est considérée en équilibre permanent avec la silice amorphe et la kaolinite qui approvisionnent la solution du sol en silicium et aluminium
- 4 cations échangeables : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ . Les coefficients de sélectivité dans la convention de Gaines et Thomas sont déterminés à partir d'expérimentations en *batch*. La capacité d'échange cationique est considérée comme constante.

Le couplage entre les modèles est effectué par l'introduction d'un terme puits source dans les équations de convection dispersion qui sont désormais couplées entre elles et non linéaires. Un procédé numérique a été mise en œuvre pour assurer la convergence de la solution ; la gestion du pas de temps tient compte du phénomène le plus contraignant, transport ou géochimie.

Dispositif expérimental

Une expérimentation a été menée au centre de recherche de l'IRD à Dakar sur un monolithe de sol non remanié de 50 cm de hauteur et 20 cm de diamètre. Le dispositif expérimental (figure 1) permet de prélever la solution à 5 niveaux (5, 15, 25, 35 et 45 cm) et à la base de la colonne, et de suivre automatiquement, à pas de temps régulier, le potentiel matriciel, l'humidité volumique et l'infiltration en condition de succion contrôlée grâce à l'utilisation d'un disque poreux. Des phases d'évaporation peuvent être simulée par de forts rayonnements infrarouges et de la ventilation.

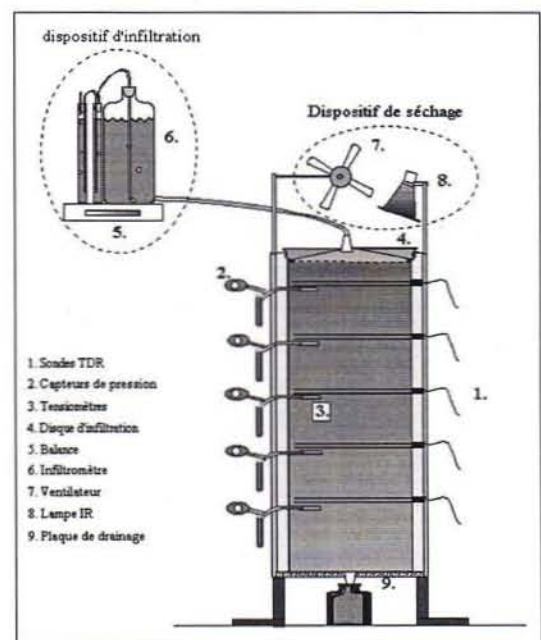


Figure 1. Dispositif expérimental de colonne de sol non remanié (IRD Dakar, Hammecker *et al.*, à soumettre)

L'ensemble est placé dans une pièce climatisée où les variations de température, autour d'une moyenne de 24°C, n'excèdent pas 2°C.

Le monolithe de sol a d'abord subi une phase d'infiltration avec de l'eau distillée, puis une phase d'évaporation intense afin de déterminer les propriétés hydrodynamiques du sol. Une solution initiale carbonatée sodique (tab.1) a ensuite été appliquée pendant 8 mois, soit environ 16 volumes poraux afin d'homogénéiser la composition chimique de la solution du sol et du complexe d'échange cationique. Enfin, une solution traçante chlorurée calcique environ 0.01N (tab.1) a été appliquée pendant 2 mois à un régime d'infiltration constant d'environ 5 mm.j⁻¹.

Concentration (meq.l ⁻¹)	Solution initiale	Solution traçante
Cl ⁻	0.02	20.95
SO ₄ ²⁻	0.06	0
Br ⁻	0.02	0
NO ₃ ⁻	0.05	0
Alcalinité	4.2	0.5
Ca ²⁺	0.31	31
Mg ²⁺	0.48	0.35
Na ⁺	3.43	0.10
K ⁺	0.27	0
CE (dS.m ⁻¹)	0.5	2.25

Tableau 1. Composition des solutions apportées sur le monolithe de sol

III – RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les conditions initiales ont été définies en fonction des caractéristiques de l'éluant à l'issue de la phase d'uniformisation. Un stock de calcite nul et la composition du complexe d'échange de 0.32, 0.49, 0.16 et 0.03 pour Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺, ont été retenus pour les simulations.

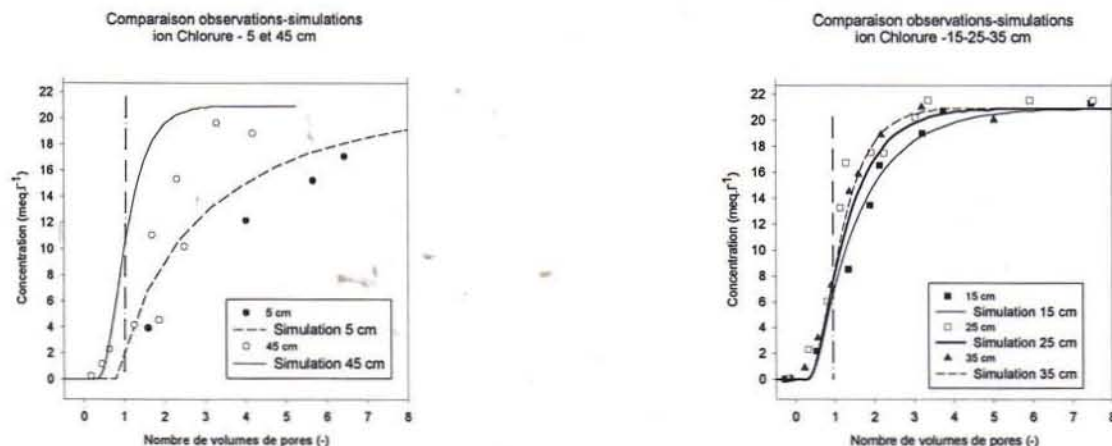


Figure 2. Comparaison entre élution des ions chlorures simulés et observés (Condom, 2000)

La dispersivité a été calée aux profondeurs de 5, 15, 25, 35 et 45 cm grâce aux courbes d'élution de l'ion chlorure. Les valeurs de $\lambda=3, 3, 1, 3$ et 1 cm ont été obtenues (fig.2) (Condom, 2000). Le modèle rend mal compte de l'élution du traceur à 5 et 45 cm quelles que soient les valeurs de dispersivité, mais les écarts entre valeurs observées et simulées sont faibles pour l'horizon 10-40 cm. A 45 cm, le sol encore humide lors du prélèvement s'est tassé lors du transport de la colonne. A 5 cm, les écoulements préférentiels sont prédominants et nous nous situons en dehors du domaine de validité du modèle convectif-dispersif. Dans les autres horizons, le nombre de Peclet (Pe) obtenu montre un écoulement fortement dispersif, certainement en limite du modèle convectif-dispersif gaussien, sous l'influence de situations de non-équilibres physiques locaux qui contribuent à disperser le signal. En conséquence, l'apparition du traceur apparaît légèrement retardée avec un retour progressif à l'équilibre.

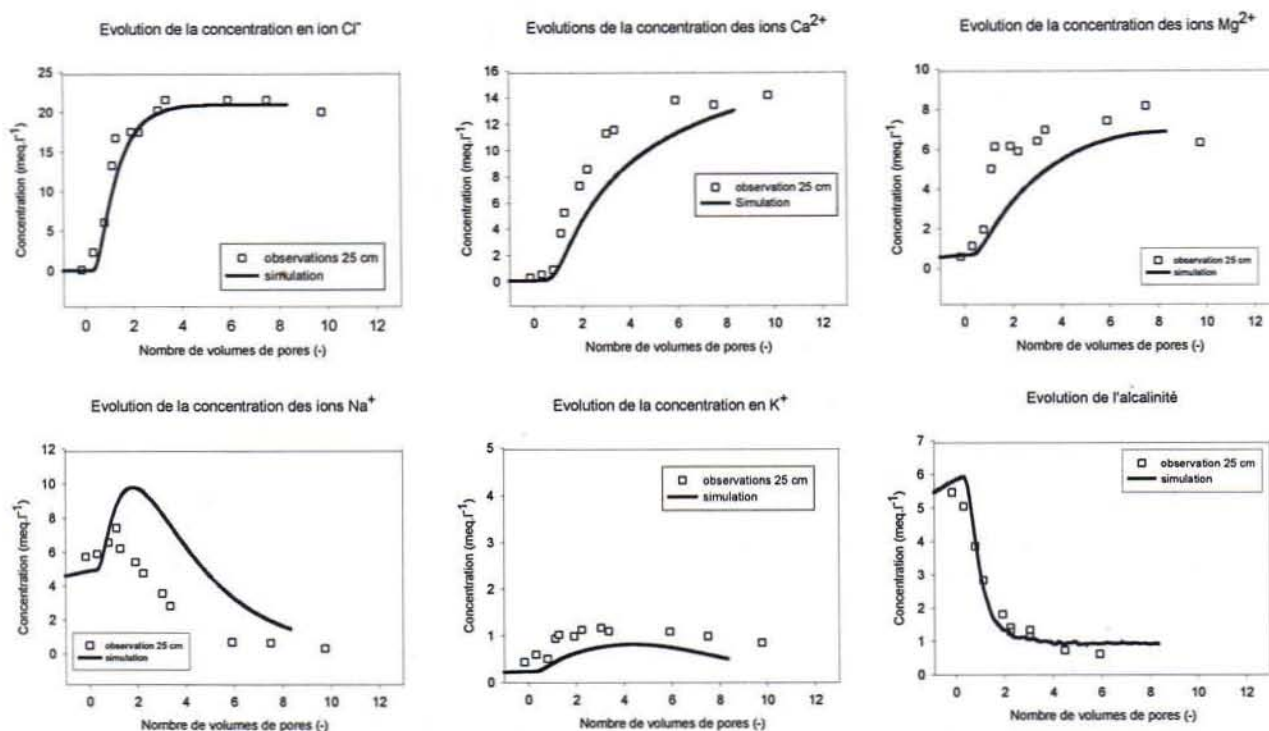


Figure 3. Comparaison entre éluions des solutés réactifs observées et simulées (Condom, 2000)

Les courbes d'éluion des solutés réactifs montrent une situation de fort déséquilibre chimique et les coefficients cinétiques chimiques ont été calés à la profondeur de 25 cm (fig.3). Les tests de sensibilité ont mis en évidence l'incidence majeure de la cinétique des phénomènes d'échanges cationiques par rapport aux paramètres cinétiques et à la pCO_2 qui influencent la précipitation-dissolution des minéraux considérés. Les valeurs suivantes ont été retenues pour les simulations (Condom, 2000):

- $8 \cdot 10^{-5} \text{ eq.l}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ pour la cinétique des échanges cationiques
- 10^{-2} atmosphère pour la pression partielle en CO_2
- $1,2 \cdot 10^{-5}$ et $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ mol.l}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ respectivement pour la calcite et les minéraux silicatés

Malgré quelques écarts résiduels, le modèle apparaît susceptible de décrire les évolutions de l'ensemble des solutés observés. Les coefficients cinétiques d'échange permettent de rendre compte de l'apparition précoce et du retour très progressif à l'équilibre du calcium qui, après l'éluion de plus de 10 volumes poraux, n'atteint qu'environ 14 meq/l encore éloigné des 21 meq/l de la solution traçante. Cette situation traduit non seulement la cinétique chimique de la réaction mais aussi l'accessibilité des sites d'échange. La cinétique de la réaction apparaît comme une constante phénoménologique caractéristique du matériau étudié.

IV – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le modèle PASTIS procure une amélioration par rapport aux modèles hydrogéochimiques existants par l'introduction de cinétiques chimiques et d'une procédure de couplage itérative, permettant d'assurer la convergence du modèle de transport. Avec l'acquisition indépendante de la plupart des paramètres nécessaires au modèle, notamment dans le domaine des équilibres géochimiques, le modèle permet de rendre compte des évolutions de la composition de l'éluant observé sur monolithe de sol au laboratoire par le seul calage de la dispersité et de coefficients cinétiques chimiques.

Cependant, un certain nombre de déficiences du modèle ou de la méthodologie ont été mises en évidence. Seuls les échanges jouent un rôle significatif tandis que les minéraux (calcite, ...) semblent avoir été fortement dissous après une période initiale de lessivage. La simulation sur monolithe de

sol d'une succession de phases d'évaporation et de lessivage devrait permettre de préciser l'influence respective de ces processus sur le transport des solutés. Sur de tels sols sodiques, la structure et les propriétés hydrodynamiques des sols sont susceptibles de se dégrader. Des expérimentations connexes réalisées dans le cadre du PNRH devraient permettre de décrire prochainement ces évolutions dans le modèle. Enfin, ce modèle n'apparaît pas suffisant pour rendre compte du fonctionnement des sols dans les systèmes de riziculture irriguée, car :

- la dynamique de la nappe et donc les conditions à la limite inférieure du système sont fortement influencées par le système d'irrigation et de drainage. L'utilisation conjointe d'un modèle de transfert hydrique en 2D est envisagée
- Les solutés sont susceptibles de diffuser vers la lame d'eau superficielle qui peut être alimentée par les irrigations ou vidangée vers le système de drainage. Le modèle de transport devra être modifié en conséquence
- La submersion des sols entraîne un certain nombre de mécanismes de réduction, du Fer notamment, dont l'influence sur les bilans d'alcalinité et les propriétés chimiques de la solution du sol est considérable. Ces mécanismes additionnels devront être introduits dans le modèle géochimique.

V – REFERENCES

- Al Droubi, A., B. Fritz, J.Y. Gac, et Y. Tardy, 1980. Generalized residual alkalinity concept : application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *Am. J. Sci.*, 280, 560-572
- Bertrand, R., 1994. L'alcalinisation/sodisation, un danger pour les périmètres irrigués sahéliens. *Sécheresse*, 3 :161-171
- Condom, N., 2000. Analyse et modélisation couplée des processus hydro-géochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). *Thèse ENSAM*, Montpellier, France
- Hammecker, C., N. Condom, J.L. Maeght et P. Boivin. Determination of unsaturated soil hydraulic and solute transfer parameters on a soil monolith. *Soil Science*, à soumettre
- Hutson, J.L. and R.J. Wagenet, 1995. An overview of LEACHM : A process based model of water and solute movement, transformation, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. *Chemical equilibrium and reaction models, SSSAJ special publication*, 42 :409-422
- Lafolie, F., 1991. Modelling water flow, nitrogen transport and root uptake including physical non-equilibrium and optimization of root water potential. *Fertilizer Research*, 27 :215-231
- Marlet, S., V. Vallès, F. lafolie et N. Condom, 1998. Hydrogeochemical modeling : a suitable approach to predict the effect of irrigation on soil salinity, sodicity and alkalinity. *ISSS world congress 1998*, Montpellier,
- Simunek, J., and D.A. Suarez, 1994. Two-dimensional transport model for variably saturated porous media with major ion chemistry. *Water Resour. Res.*, 30(4) :1115-1133
- Vallès, V., et F. Bourgeat, 1988. Geochemical determination of the gypsum requirement of cultivated soils. I. Development of the thermodynamic model GYPSOL simulating the irrigation water-soil chemical interactions. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2 :165-177